

Kamera-dolly timelapse-kuvaamiseen

Tuomas Roivas

Opinnäytetyö

Kevät 2012

Tietotekniikan koulutusohjelma

Oulun seudun ammattikorkeakoulu

ALKULAUSE

Opinnäytetyötä on työstyetty Oulun seudun ammattikorkeakoulun tekniikan yksikön Raahen kampuksella kevään 2011 ja kevään 2012 välisenä aikana. Työtä on kehitetty Oulun yliopiston NMR-laboratoriolle. Työn yhteyshenkilönä Oulun yliopistolle on toiminut Marcin Selent. Opinnäytetyön ohjaajana on toiminut Juha Rätty, jolta olenkin saanut hyviä vinkkejä tarvittaessa, kun on sattunut tulemaan vaikeuksia eteen.

Tuomas Roivas

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Tietotekniikan koulutusohjelma, mobiiliteknologia

Tekijä: Tuomas Roivas

Opinnäytetyön nimi: Kamera-dolly timelapse-kuvaamiseen

Työn ohjaaja: Juha Rätty

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2012

Sivumäärä: 34+6

Työn aiheena oli suunnitella timelapse-valokuvaukseen soveltuva helposti siirrettävä ratalaitteisto. Työn teettäjänä toimi Oulun yliopiston fysiikan osaston NMR-laboratorio, joka myös muodosti omanlaisen haasteensa työhön. NMR-laboratoriossa tutkitaan magneettikenttien vaikutusta eri aineilla, ja tämä rajoitti jonkin verran magneettisten materiaalien käyttöä.

Työssä sain tutustua aika paljon alumiinin työstämiseen eri välineillä, kuten kieretyökaluilla. Paljon uutta tietoutta saatiin askelmoottorien toiminnasta sekä niiden ohjaamisesta että niiden erilaisista ohjainpiireistä. Työ sisälsi myös elektronikkasuunnittelua ja simulointia Multisim-ohjelmalla. KytKentä tuli myös kasata piirilevyille, jolloin pääsin tekemään myös juotostöitä. KytKennät testattiin koulun laboratoriossa oskilloskoopin avulla.

Työssä suunniteltiin ja rakennettiin itsenäisesti toimiva kamera-dolly-järjestelmä. Työn kehitys jatkuu vielä toiminnallisuuksien lisäämisellä. Dollyyn rakennetaan panorointi- ja tilitysausmahdollisuudet. Työtä jatkettaneen projektikurssityönä erään koulumme opiskelijan toimesta.

Asiasanat: askelmoottori, ajastinpiirit, alumiini, valokuvaus-, elokuvaus- tai videolaitteet.

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Information Technology, Mobile Technology

Author: Tuomas Roivas

Title of thesis: Designing a Camera Dolly for a Time-lapse Photographing

Supervisor: Juha Räty

Term and year of completion: Spring 2012

Number of pages:34+6

The aim of this Bachelor's thesis was to design an easily portable rail device suitable for a Time-lapse-photography. The work was commissioned by the NMR laboratory of Oulu University, which also brought challenges to the work. The NMR laboratory researches magnetic fields on different substances, and this limited the use of magnetic materials.

During this work I got knowledge of different tools and working methods with aluminium, like how to make threads to aluminium. I got a lot of new knowledge of how to operate and control stepper motors, and how their different driver circuits work. This work also included electronics design and simulation with a Multisim program. Also, I built and soldered these designs to a PCB. These circuits were tested and analyzed at school's laboratory with an oscilloscope.

In this project an independent camera dolly system was designed and built. The development will continue by adding functionality to it. There will be built pan and tilt options to the dolly. This work might be continued by one of our school's student as a project course work in future.

Keywords: stepper motor, timer integrated circuits, aluminium, photographic or filming or video equipment.

SISÄLLYS

ALKULAUSE	1
SISÄLLYS	4
KÄSITTEITÄ	6
1 JOHDANTO	8
1.1 Timelapse-valokuvaaminen	8
1.2 Kamera-dolly -järjestelmä	8
2 MÄÄRITELMÄ	10
2.1 Valokuvaustekniikoista	10
2.2 Timelapse-kuvaus liikkeessä	11
2.3 Kuvauslaitteisto	11
3 TOIMINTAYMPÄRISTÖ	12
3.1 Laitteen toimintaympäristö	12
3.2 Laitteen rakenne	12
3.2.1 Rungon rakenne	13
3.2.2 Laitteen elektroniikka	13
4 TOTEUTUS	15
4.1 Ensimmäinen prototyyppi	15
4.1.1 Dollyn rakenne	15
4.1.2 Dollyn motorisointi	16
4.2 Lopullinen dolly	19
4.2.1 Liukuradan rakenne	20
4.2.2 Dollyn runko	22
4.2.3 Dollyn ohjauselektroniikka	23
5 TESTAUS	27
5.1 Alumiinisen kiskolaitteiston testaus	27
5.2 Dollyn moottorin testaus	27
5.3 Ohjauselektroniikan testaus	29
6 JATKOKEHITYSMAHDOLLISUUDET	32
7 YHTEENVETO	33
LÄHDELUETTELO	34

KÄSITTEITÄ

Astabiili	Jatkuvasti värähtelevä piiri. Ei tarvitse ulkoista ohjausta.
Bipolaarinen askelmoottori	Askelmoottori, jossa virta voi kulkea moottorin käämeillä kumpaankin suuntaan.
Bistabiili	Piiri, joka on vakaa kahdessa tilassa. Kun trigger-tulo liipaistaan, jää lähtö aktiiviseksi niin kauaksi aikaa, kunnes reset-tulo liipaistaan. Tämän tyyppisestä piiristä käytetään myös yleisesti nimitystä flip-flop.
Dolly	Vaunu jolla kamera kulkee kiskoja pitkin.
Monostabiili	Piiri, joka pyrkii pysymään aina samassa tilassa. Lähdön tilaa voidaan muuttaa hetkellisesti ulkoisella liipaisulla.
PAL-järjestelmä	Standardi-järjestelmä jota käytetään standardipiirto tv-lähetysten siirrossa suuressa osassa Eurooppaa.
Panorointi	Kameran liikuttaminen pystyakselinsa ympäri kuvauksen aikana.
Pulssisuhde	Kuvaa signaalissa olevien puolijaksojen suhdetta kokonaisjakson aikaan.
Reset-tulo	Piirin tulo, johon voidaan tuoda liipaisusignaali, joka muuttaa piirin lähdön inaktiiviseksi.
Tiltaus	Kameran liikuttamista vaaka-akselinsa ympäri kuvauksen aikana.

Trigger-tulo	Piirin tulo, johon voidaan tuoda liipaisusignaali, joka muuttaa piirin lähdön aktiiviseksi.
Unipolaarinen askelmoottori	Askelmoottori, jossa virta voi kulkea ainoastaan yhteen suuntaan, keskinavalta pois päin.
Vero-levy	Vero Technologies Ltd, & Pixel Print LTD Canada yrityksen mukaan nimetty prototyypin valmistukseen kehitetty juova- tai pistekuparoitu piirilevy.

1 JOHDANTO

Työssä piti suunnitella ja rakentaa timelapse-kuvaamiseen soveltuva ratalaitteisto. Aiheen työlle antoi tarve tämälätyyppiselle laitteistolle Oulun yliopiston NMR-laboratoriossa. Tähän käyttöön soveltuvia kaupallisia laitteistoja ei ole kovin paljon markkinoilla tarjolla, ja lisäksi valmiiksi rakennetut ratkaisut ovat varsin kalliita, joten tämä antoi idean rakentaa ja suunnitella tarvittava laitteisto itse.

1.1 Timelapse-valokuvaaminen

Timelapse-valokuvausta voidaan myös kutsua intervallikuvaamiseksi. Timelapse-valokuvauksessa otetaan valokuvia tietyn väliajan eli intervallin välein. Timelapse-valokuvaus on omimmillaan, kun seurataan hitaasti etenevien tapahtumien kulkua, kuten kasvien kasvua tai rakennustöiden edistymistä.

Kuvat voidaan ottaa esimerkiksi viiden sekunnin välein. Yksittäisistä valokuvista yhdistetään editointivaiheessa yhtenäistä videota, joka toistetaan nopeudella 25 ruutua per sekunti, joka on yleinen ruutunopeus PAL-järjestelmässä. Jos videolle halutaan pituutta esimerkiksi 30 sekuntia 25 ruudun kuvanopeudella, tarvitaan yksittäisiä kuvia 750 kappaletta. Tällöin saadaan video, jossa tulee vaikutelma nopeutetusta videosta, jossa ei ole tavallisella tavalla nopeutetun videon tapaista häntimistä. Liikettä voidaan vielä muuttaa vielä sulavammaksi kasvatamalla ruutunopeutta esimerkiksi 50 ruutuun per sekunti, jota käytetään osassa teräväpiirtotuotantoa. Tosin tällöin kuvien tarve kaksinkertaistuu sekä videotiedoston tilantarve myös kasvaa oleellisesti.

1.2 Kamera-dolly -järjestelmä

Kuvattaessa timelapse-videoita voidaan kamera pitää paikallaan tai se voi myös olla liikkeessä kuvauksen aikana. Kun kamera on kuvauksen aikana liikkeessä, videoon saadaan varsin näyttävä tehoste. Jos halutaan saada kamera liikku-

maan kuvauksen aikana, sen tulee tapahtua erittäin tasaisesti ja vakionopeudella. Tämänlaisissa tapauksissa käytetään yleensä erilaisia dolly-kiskojärjestelmiä. Järjestelmä koostuu kuvauspaikalle sijoitettavista kiskoista sekä kiskoilla liikkuvasta vaunusta eli dollystä.

2 MÄÄRITELMÄ

Työssä tullaan suunnittelemaan ja valmistamaan kamera-dolly sekä sille soveltuva kiskojärjestelmä. Dollyyn tultaneen myös toteuttamaan kameralle teline, jolla voidaan sekä panoroida että tiltata.

2.1 Valokuvaustekniikoista

Puhuttaessa valokuvauksen ja videokuvaamisen yhteydessä panoroinnista ja tiltauksesta tarkoitetaan sillä kameran liikettä vaaka- ja pystyakseleilla. Kuva 1 havainnollistaa tämän hyvin; kun kameraa liikutetaan horisontaaliakselinsa ympäri, puhutaan panoroinnista. Toisaalta, kun kamera pyörii vertikaaliakselinsa ympäri, on kyse tiltauksesta.



KUVA 1. Panorointi ja tiltaus (Brickhouse security).

Suunnittelussa tulee ottaa huomioon laitteiston siirrettävyys ja keveys. Sen tulee olla myös helposti purettavissa, että se menee pieneen tilaan kuljetusta varten. Laitteiston tulee olla myös niin tukeva, ettei kuvauksen aikana tapahdu kiskojen taipumista eikä muita kuvausta haittaavia värinöitä.

2.2 Timelapse-kuvaus liikkeessä

Dollyn moottorointi asettaa myös erilaisia haasteita suunnitteluun. Koska time-lapse-kuvaaminen perustuu suurelta osin liikkeen hitauteen, tulee vaununkin liikkua kiskoilla verraten hitaasti. Dollyssa tullaan käyttämään askelmoottoria pääasiassa sen liikuttamiseen. Askelmoottoreiden etuna on niiden tarkka kontrollointi kohtuullisen edukkaasti ja helposti.

Vaikka askelmoottoreita voidaan pyörittää varsin hitaasti, joudutaan työssä todennäköisesti silti käyttämään alennusvaihteistoa. Tämä siksi, että vaikka vau-
nu kulkisikin tarpeeksi hitaasti, liike voi olla muuten varsin nykivää.

2.3 Kuvauslaitteisto

Kiskoina tullaan käyttämään alumiiniputkea sen keveyden ja jäämäkkyiden vuoksi. Alumiinin käyttöä puoltaa myös sen helpohko työstettävyyys, sillä alumiiniputkea voi helposti katkaista putkileikkurilla ja siihen on helppoa työstää tarvittaessa kierteitä.

Koska vaunun tulee liukua näillä putkilla tasaisesti, sille tarvitaan liu'ut, joita pitkin vaunu kulkee tasaisesti halutun matkan. Vaunun runko valmistetaan nylon-materiaalista, koska sillä on muutamia erinomaisia ominaisuuksia. Nylonia voidaan porata ilman halkeamisvaaraa, ja sitä on mahdollista kierteittää toisin kuin monia muita muoveja. Se on myös itsevoiteleva materiaali, jolloin ei välttämättä tarvita erillisiä laakereita tai liukuja vaunuun. Nylonilla tosin on yksi mahdollisesti haittaava ominaisuus, sillä sitä ei voi liimata, vaikka tarve sitä vaatisi.

3 TOIMINTAYMPÄRISTÖ

Keväällä 2010 aloin etsiä aihetta opinnäytetyölleni ja, koska tiesin haluavani vahvasti HW-painoitteisen aiheen, otin yhteyttä Juha Rättyyn. Sopiva aihe löytyikin eräästä multimediaprojektista Oulun yliopistolle. Fysiikan osaston NMR-laboratorio oli tekemässä esittelyvideota omasta osastostaan, mihin tarvittiin kuvauskalustoon timelapse-kuvaukseen soveltuva dolly.

3.1 Laitteen toimintaympäristö

NMR-laboratorioissa tehdään kokeita voimakkailla supermagneeteilla sekä testataan magneettikenttien vaikutusta eri aineissa ja materiaaleissa. Laboratoriossa vaikuttavat voimakkaat magneettikentät vaikuttivat suurelta osin materiaallivalintoihin rakennettavassa dollyssä. Tämän vuoksi pyrittiinkin rajaamaan magneettisesti aktiivisten aineiden, kuten rauta, käyttöä mahdollisimman vähäiseksi.

NMR-laboratoriossa vaikuttavat voimakkaat magneettikentät aiheuttavat monenlaisia vaikutuksia ympäristöön. Kun kävimme tutustumassa laboratorioon, saimme nähdä, kuinka magneetti alkoi vetää puoleensa rautanaulaa jo noin metrin päästä. Jos tämä sama tapahtuu jollakin isommalla metalliesineellä, voi olla lähes mahdotonta irrottaa esinettä magneetista ilman niiden alasajoa. Jos alasajo täytyy tehdä, joudutaan suprajohteisissa magneeteissa oleva nestemäinen helium vapauttamaan ilmaan. Lisäksi laitteisto joudutaan täyttämään uudelleen, mikä on todella kallista.

3.2 Laitteen rakenne

Laitteen rakentamiseen tarvittavien työkalujen ja tilojen puute osaltaan hieman rajoitti toteuttamista. Onneksi itselläni oli omien harrastusten kautta tarvittavia käsi- ja sähkötyökaluja, kuten avaimia, porakoneita ja teriä sekä muuta tarpeellista välineistöä. Oulun yliopisto tarjosi myös käyttöömme omaa pajaansa, mutta

osien teettämistä siellä rajoitti osittain vieras CAD-suunnitteluympäristö, ongelmana oli lisäksi välimatka Raahen ja Oulun välillä.

Lähtökohtana laitteen suunnittelussa oli laitteen itsenäisyys. Dollyn tuli toimia siten, ettei sitä valvomaan tarvita ihmistä. Kun kameratelineelle annetaan tietty nopeus, sen tulee osata jatkaa sillä itsenäisesti ja sen lisäksi aina radan päätepisteissä vaihtaa suuntaansa.

3.2.1 Rungon rakenne

Alunperin dollyyn suunniteltiin liukumateriaaliksi nylonia, mutta sen saatavuus osoittautui huonoksi paikallisissa kumi- ja muovialan liikkeissä. Eräässä liikkeessä sain hyviä neuvoja vastaavista muovilaaduista: myyjä suositteli muutamia eri laatuja polyeteenistä, joita käytetään liukumateriaaleina monissa teollisuuden sovellutuksissa, kuten liuku- ja ohjainkiskoissa. Materiaaliksi valikoitui vihreä polyeteenimuovi, RCH-1000, joka on näistä muovilaaduista kulutuskestävin. Tätä muovilaatua myy Joensuussa mm. Joen kumi.

3.2.2 Laitteen elektroniikka

Laitteen moottoriksi valikoitui 24 voltin bipolaarinen askelmoottori, tyypiltään Minebea 17PM-K042-01V. Bipolaarista askelmoottoria voidaan ohjata tarkemmin kuin unipolaarista askelmoottoria. Bipolaarisen askelmoottorin tarkkuus ja tehokkuus perustuu siihen, että moottorin käämeissä virta pystyy kulkemaan kumpaankin suuntaan. Sen sijaan unipolaarissa moottoreissa käämeissä on keskusjohtimet, jotka on yhdistetty pysyvästi käyttöjännitteeseen, jolloin virta voi kulkea ainoastaan yhteen suuntaan. (Wexon Oy ja Laine M.)

Askelmoottorin valintaa puolsi sen tarkka ohjattavuus, koska askelmoottori toimii aina yhden askeleen kerrallaan. Tässä askelmoottorissa yhtä askelta vastaa akselin pyörähtäminen $1,8^\circ$. Tällöin kokonaisen 360° pyörähdykseen tarvitaan jo 200 askeleen syöttäminen. Omien kokeilujemme perusteella tässä kyseisessä askelmoottorissa oli myös varsin paljon voimaa pieneen kokoonsa nähden.

Askelmoottorit tarvitsevat myös niin kutsutun driverin eli ohjauspiirin, jotta sitä voidaan käyttää. Ohjauspiiri päädyttiin hankkimaan valmiina, sillä sellaisen suunnitteluun ja valmistukseen olisi kulunut aivan liian paljon aikaa. Hankittu ohjauspiiri olikin tarpeeseemme oikein käytännöllinen, sillä siinä oli valmiina painonapit, joilla voitiin säätää nopeutta sekä vaihtaa moottorin pyörimissuuntaa.

4 TOTEUTUS

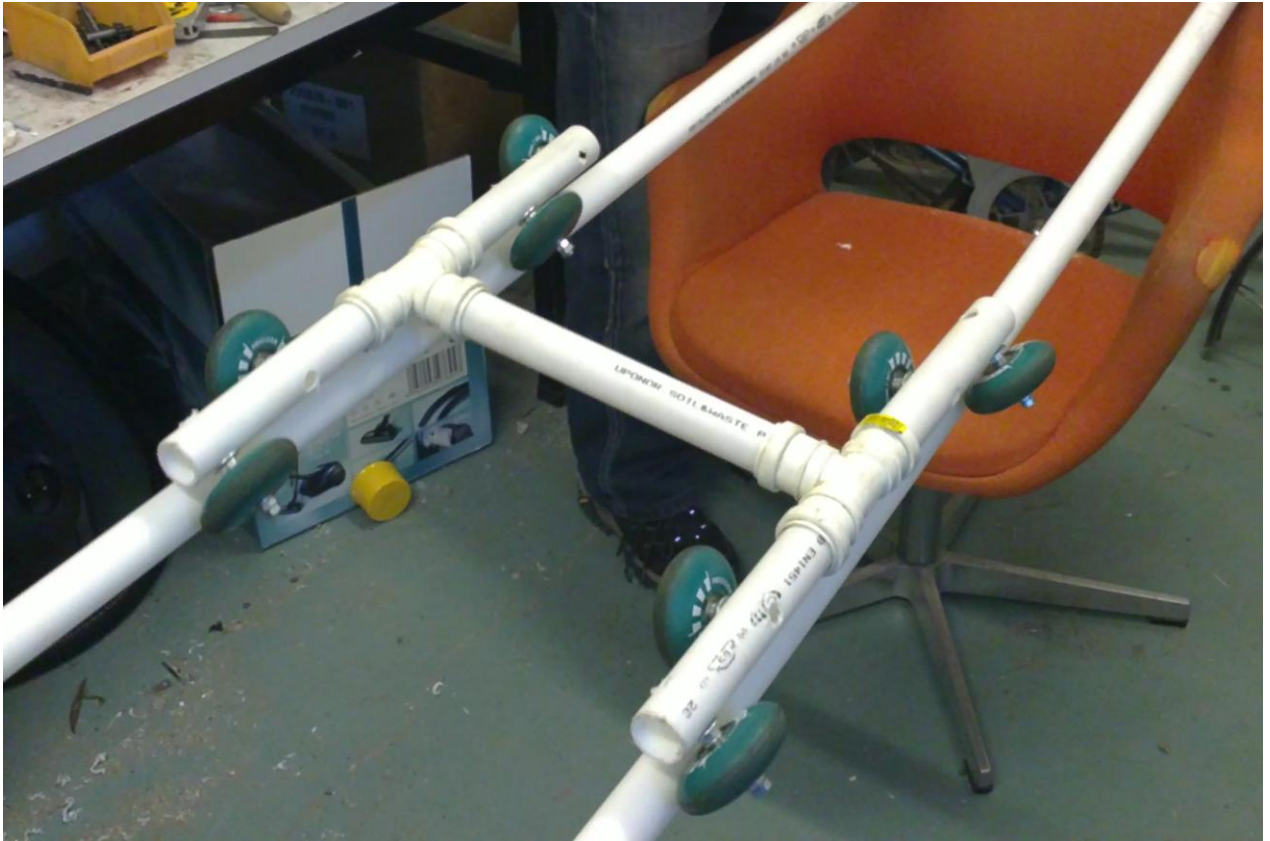
4.1 Ensimmäinen prototyyppi

Ensimmäisen prototyypin rakentaminen aloitettiin kevättalvella 2010. Ensimmäinen versio kamera-dollystä tarvittiin aika pikaisesti, joten suunnittelu sekä toteutus tuli tehdä kohtuullisen nopeasti. Kun tutkittiin muutamia erilaisia dolly-ratkaisuja, päädyttiin monen hyväksi havaitsemaan 32 mm:n polypropeeniputkeen. Tästä materiaalista valmistettiin raiteet dollylle. sekä suuri osa dollyn runkorakenteesta.

4.1.1 Dollyn rakenne

Ensimmäisen dollyn suunnittelussa lähdettiin liikkeelle suhteellisen yksinkertaisesta rakenteesta. Suunnittelussa tuli ottaa myös huomioon materiaalit siten, että ne soveltuvat käytettäväksi NMR-laboratoriossa. Siellä vaikuttavat voimakkaat magneettikentät, joten ei ollut mielekästä käyttää magneettisesti aktiivisia materiaaleja. Materiaalina päädyttiin käyttämään 32 mm:n polypropeeniputkea. Tästä samasta materiaalista voitiin rakentaa sekä kiskot dollylle että itse dollyn t-haaroja apuna käyttäen, kuten kuvasta 2 voidaan nähdä.

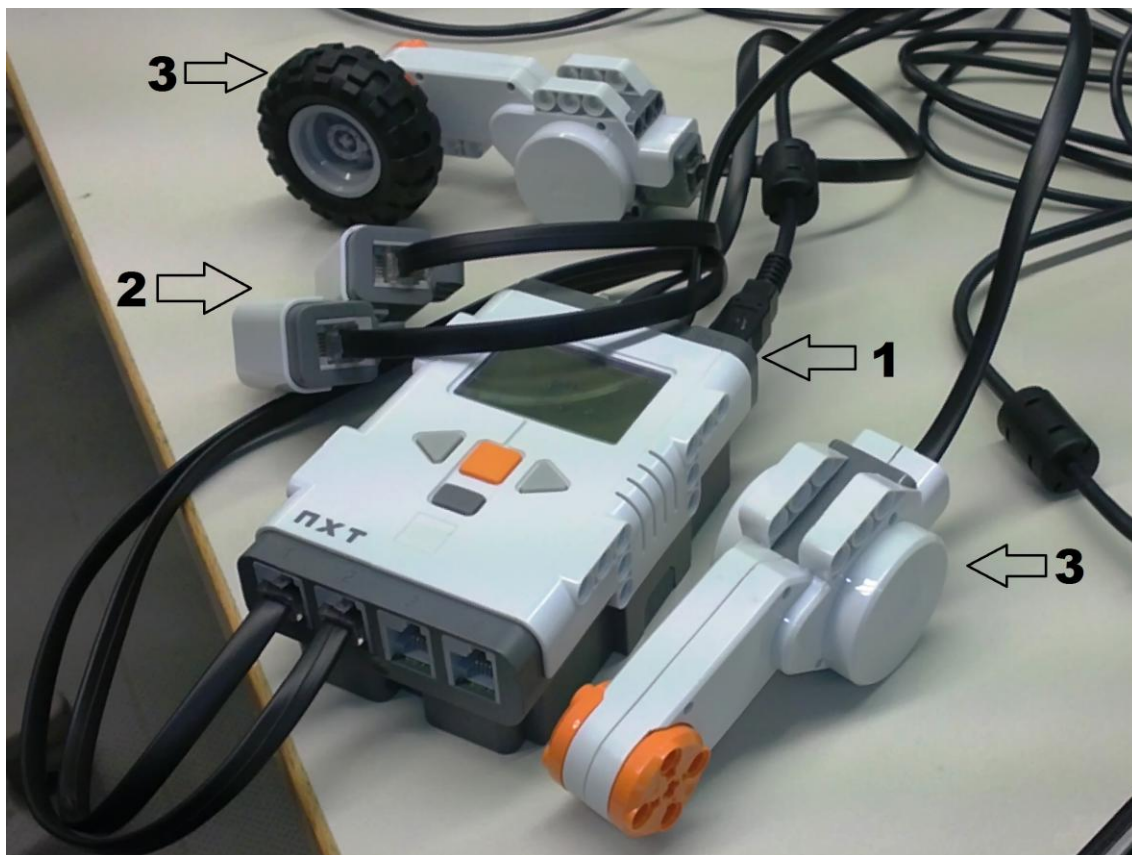
Dolly itsessään liikkuu kiskoilla kahdeksan renkaan varassa. Rengasparien pyörät on sijoitettu toisiinsa nähden n. 45 asteen kulmaan, jolloin renkaat liikkuvat putken päällä kuitenkin putoamatta siitä pois. Renkaina käytettiin rullaluistimissa käytettäviä kumisia pyöriä, sillä ne liikkuvat erinomaisen tasaisesti hyvän laakerointinsa ansiosta.



KUVA 2. Prototyypin dollyn runkorakenne.

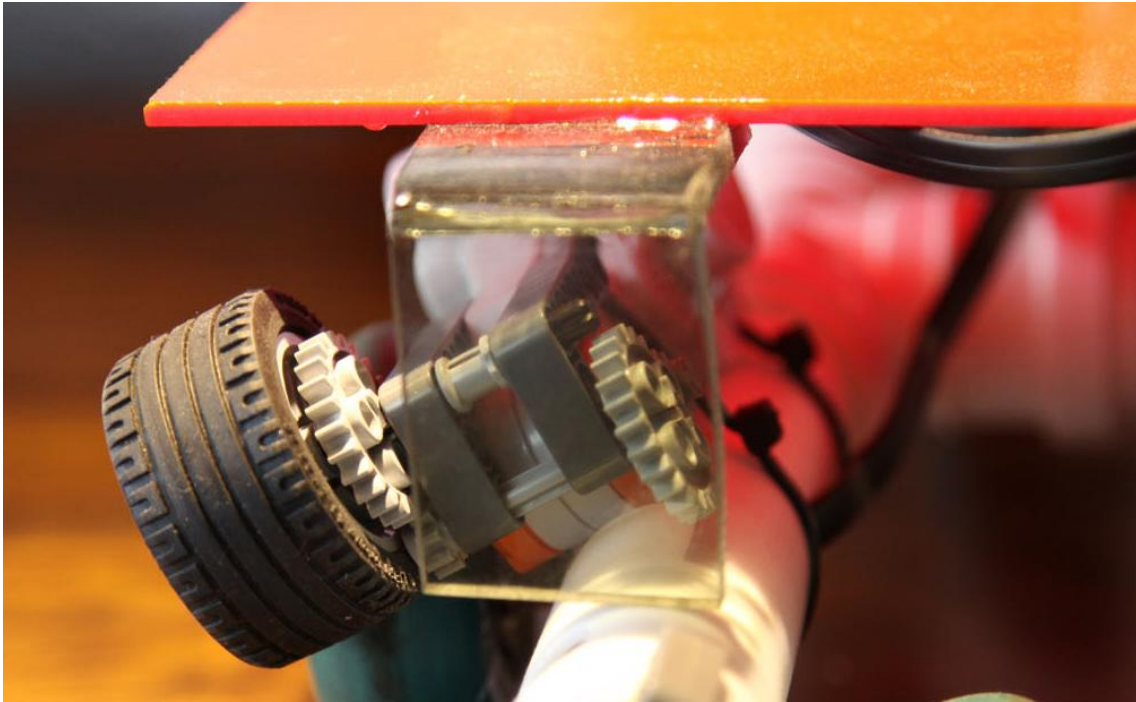
4.1.2 Dollyn motorisointi

Dollyn liikuttamiseen päädyimme käyttämään koululta löytyvää Lego NXT -kehitysympäristöä. Kuvassa 3 numero 1 merkattua Lego NXT -yksikköä voidaan ohjelmoida tietokoneella olevalla Lego mindstorms -ohjelmistolla. Yksikköön ohjelmoitiin tällä ohjelmistolla for-silmukka, eli silmukan sisällä olevaa koodia toistetaan ikuisesti. Näin dolly kääntää suuntansa automaattisesti kiskojen loppuessa. Suunnanvaihdon tarpeen yksikkö rekisteröi siihen liitetyillä painonapeilla, jotka osuvat vasteisiin radan päätepisteissä. Näin dollystä saatiin itsenäinen, ja se toistaa haluttua liikettä niin kauan, kunnes yksikkö tarvitsee uudet paristot.



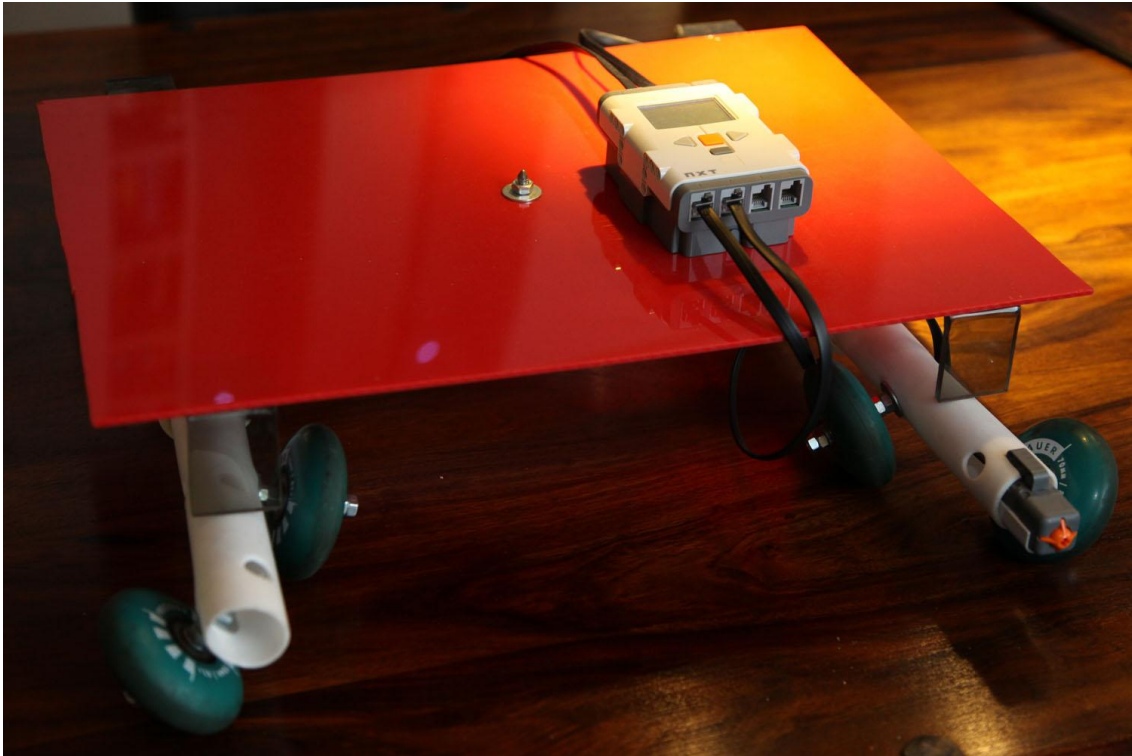
KUVA 3. Lego NXT -kehityssarja.

Kuvassa 3 voidaan myös nähdä suunnanvaihtoon käytetyt painonappitunnistimet merkattuna numerolla 2. Kuvassa 5 on prototyyppi-dolly valmiina ja siitä voidaan nähdä, kuinka painonapit on sijoitettu osumaan radan lopussa oleviin vasteisiin. Kuvassa 3 on numeroituna 3:lla NXT-kehityssarjaan sisältyvä servo-tyyppinen moottori, jota voidaan ohjata NXT-yksiköllä. Kuvasta 4 voidaan nähdä, kuinka moottori on sijoitettu pyörittämään vihreätä rullaluistimen pyörää. Samasta kuvasta nähdään myös yksinkertaisen alennusvaihteiston rakenne osittain. Alennusvaihteisto oli lähes välttämätön rakentaa, sillä NXT-sarjaan sisältyviä moottoreita ei voitu pyörittää kovinkaan hitaasti ilman merkittävää vääntöhukkaa.



KUVA 4. Moottorin sijoitus dollyyn.

Kuvasta 4 voidaan nähdä, kuinka voima siirretään moottorilta alennusvaihteiston kautta kumipyörälle. Kumipyörältä voima siirtyy dollyn renkaaseen, jonka varassa laitteen runko on. Dollyssä on näitä moottori-alennusvaihteistoyhdistelmiä kaksi kappaletta, oikealla ja vasemmalla puolella omansa. Ratkaisu oli hyvin toimiva. Voiman välitys tapahtui luotettavasti sekä moottorin voima moninkertaistui alennusvaihteiston avulla. Testiemme perusteella dolly jaksoi kuljettaa useammankin kilon painoista kuormaa.



KUVA 5. Valmis prototyyppi-dolly.

Valmista dollyä testattiin jonkin verran kotioiloissa, ja se havaittiin hyvin toimivaksi. Tämän jälkeen laite toimitettiin Oulun yliopistolle testikäyttöön, jossa se oli käytössä n. puoli vuotta. Kuvassa 5 on dolly testikäytön jäljiltä. Dolly oli toiminut käytössä varsin hyvin. Pienenä ongelmana oli ollut renkaiden linjauksen muuttuminen, koska putkia, joihin renkaat on kiinnitetty, ei ollut kiinteästi asennettu t-haaroihin. Prototyyppi olikin varsin toimiva ja varmatoiminen. Suurin ongelma laitteessa oli sen suuri koko, minkä polypropeeniputkesta valmistetut kiskot vaativat.

4.2 Lopullinen dolly

Kun aloitettiin suunnitella toista kehitysversiota dollystä, tärkeimpänä prioriteettina oli saada laitteesta mahdollisimman helposti liikuteltava ja pienessä tilassa kulkeva. Radan materiaalissa päädyimme 12 mm:n alumiiniputkeen sen keveyden, tukevuuden ja helpohkon työstettävyyden vuoksi. Itse dollyyn päädyimme käyttämään polyeteeni-muovia, koska se toimii itsessään liukumateriaalina ja siihen on helppo tarvittaessa koneistaa kierteet kiinnitettävälle osille. Dollyn lii-

kuttamisesta vastaa bipolaarinen askelmoottori, johon on yhdistetty sille sopiva ohjainpiiri.

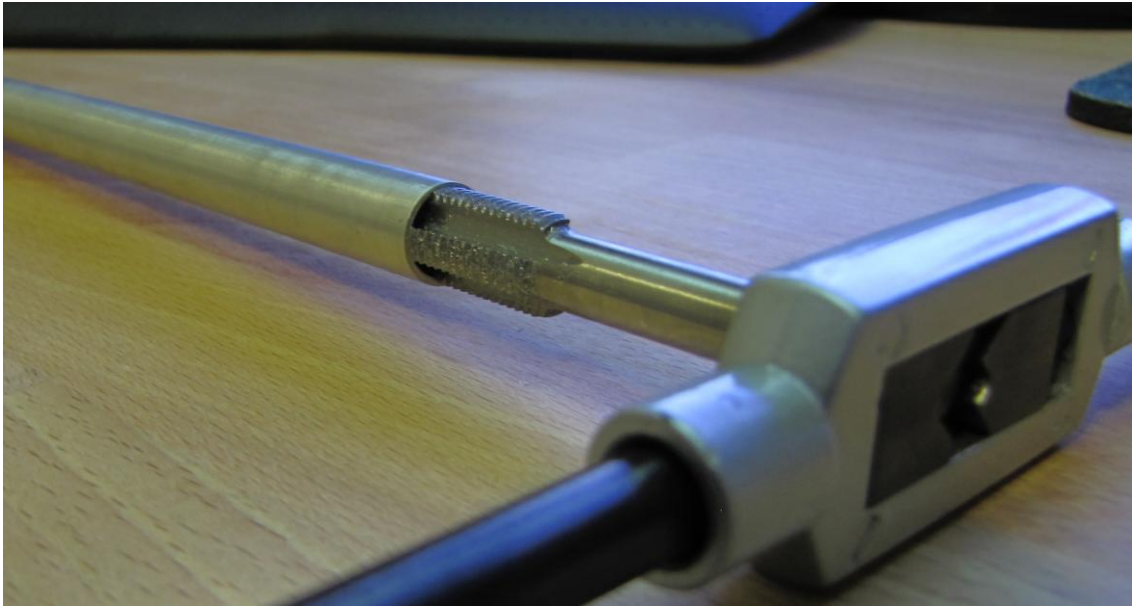
4.2.1 Liukuradan rakenne

Dollylle tuleva liukurata päädyttiin rakentamaan alumiiniputkesta. Tämänkaltaisia alumiiniputkia sai rauta-alan liikkeistä varsin hyvin, halkaisijoissa oli hyvin valinnan varaa, ja hinta oli varsin kustannustehokas.



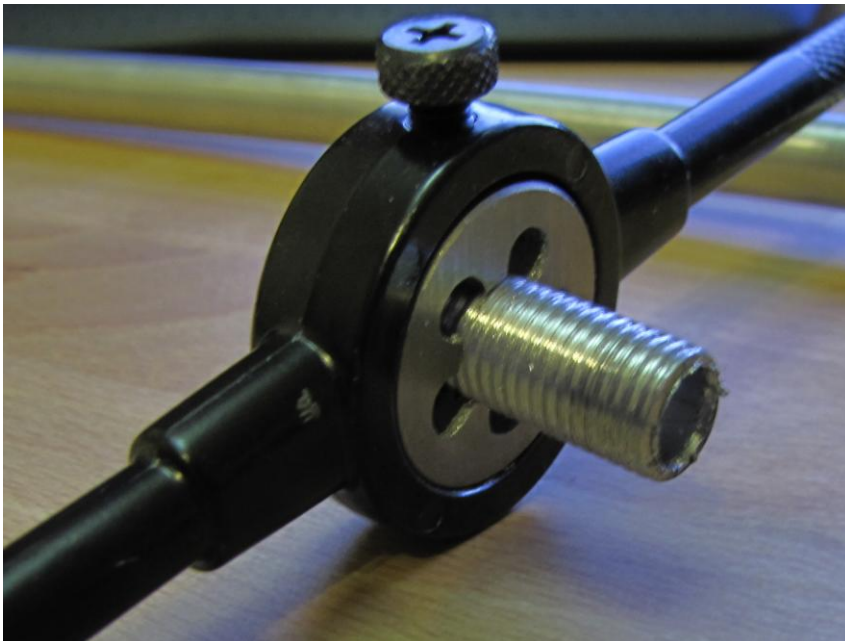
KUVA 6. Putkileikkuri.

Alumiinin käyttöä puolsi myös sen kohtuullisen helppo työstettävyys; putkien työstäminen onnistuikin ihan kohtuullisesti kotiooloissa. Putkea oli helppoa lyhentää sopivan mittaiseksi putkileikkurilla (kuva 6). Putken koossa päädyttiinkin 12 mm:n putkeen, joka oli jo varsin tukevaa ja se oli myös yllättävän kevyttä.



KUVA 7. 12 mm:n putken sisäosan kierre.

Jotta radasta saataisiin purettava, tuli putket katkaista, mutta tämän takia piti keksiä keino, millä liittää ne toisiinsa helposti kuvauspaikalla. Pienen pohdinnan tuloksena päädyttiin koneistamaan kierteet 12 mm:n putken sisäpintaan. Koska putken sisähalkaisija oli n. 10 mm, ei voitu käyttää metrisiä kierrekokoja. Tällöin ei olisi saatu kierteele tarpeeksi tarttumapintaa. Ratkaisu löytyikin tuumaisesta kierremitoituksesta; 7/16" kierretapilla saatiin juuri sopiva kierre 12 mm:n putken sisäpinnalle (Kuva 7).



KUVA 8. 10 mm:n putkesta valmistettu jatkospala.

Putkien toisiinsa liittämiseksi tarvittiin kierteisiin sopiva jatkos. Tässäkin tapauksessa materiaaliksi valikoitui alumiiniputki. Kun suoritettiin hieman mittauksia ja kokeiluja, huomattiin että 10 mm:n putken ulkopinnalle saatiin koneistettua hyvin myös 7/16" kierre (Kuva 8).



KUVA 9. Valmis jatkos.

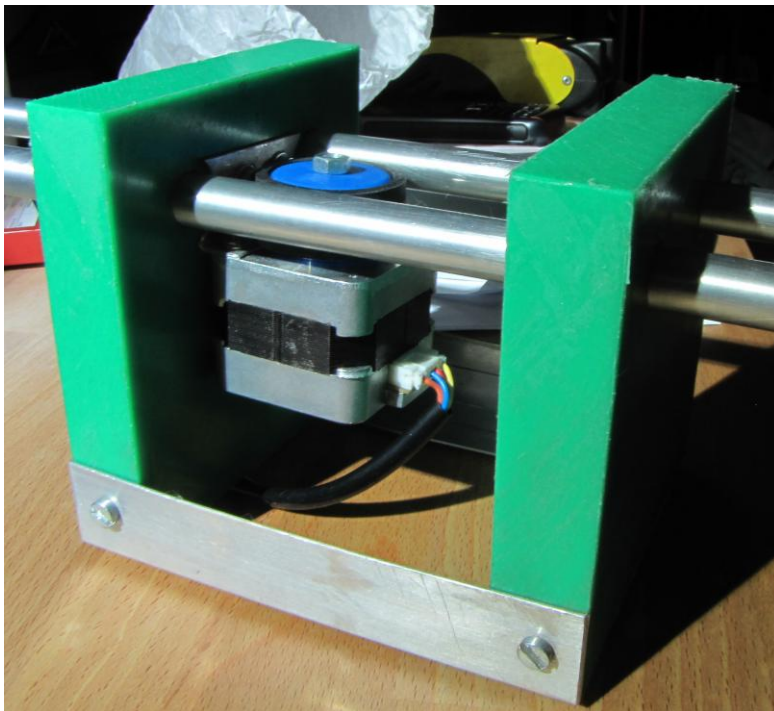
Kuvasta 9 voidaan nähdä, kuinka jatkospalalla voidaan liittää toisiinsa niin monta putkea kuin tarve vaatii.

4.2.2 Dollyn runko

Dollyn runkoon käytettiin liukumuoviksi tarkoitettua polyeteeni-muovia sekä alumiinilevyä, josta taivutettiin sopivat kulmaraudat pitämään dollyn runko kasassa. Polyeteeni-levyihin koneistettiin kierteet koneruuveille, joilla voitiin kiinnittää alumiinista valmistetut kulmaraudat tukevasti muoviin. Rakenteesta tulikin varsin tukeva, levyt pysyvät hyvin linjassa eivätkä vääntyile kiinnityspisteistään.

Polyeteeniin porattiin alumiiniputkelle soveltuvat reiät pylväsporakoneessa reikien suoruuden takaamiseksi. Kuvasta 10 voidaan nähdä, kuinka alumiinikiskot

kulkevat kahden levyn läpi ja kuinka askelmoottori on sijoitettu liikuttamaan dollyä suurikittaisen vetopyörän avulla.



KUVA 10. Dollyn runko ja putket, joilla se liukuu.

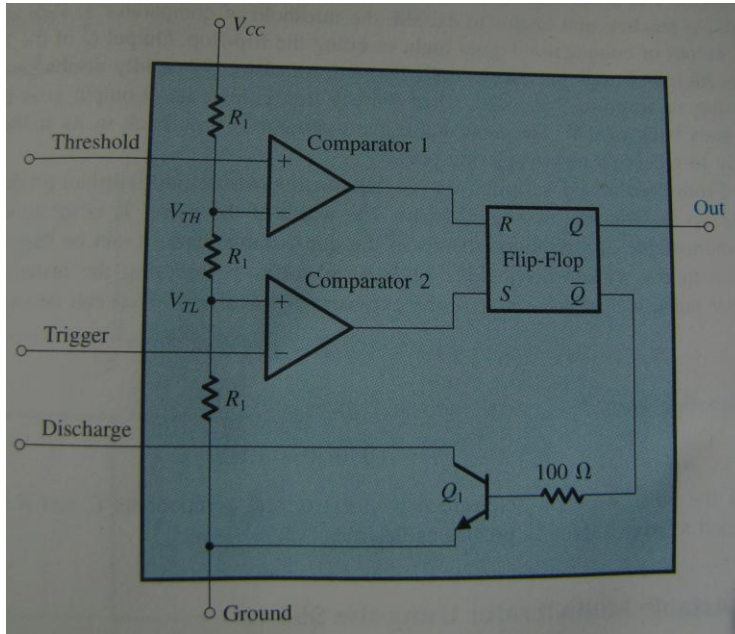
4.2.3 Dollyn ohjauselektronikka

Laitteen ohjaamiseen tarvitaan moottorin lisäksi jonkin verran ohjauselektronikkaa. Se koostuu askelmoottoriohjaimesta ja siihen liitettävistä pulssigeneraattorista ja flip-flopista. Askelmoottoriohjain hankittiin valmiina, mutta se tarvitsi silti muutaman lisäosan loogiseen toimintaan.

Askelmoottoriohjaimessa on pulssisisäänmeno, jolla moottorin nopeutta voidaan kontrolloida. Nopeus säätyy pulssin tiheyden mukaan. Pienellä taajuudella moottori pyörii hitaasti, ja taajuutta suurennettaessa nopeus kiihtyy. Ohjainta testattiin signaaligeneraattorilla ennen pulssigeneraattorin rakentamista, jolloin huomattiin, että pulssien tuli olla varsin kapeita eli pulssisuhteen tuli olla pieni.

Näihin testaustuloksiin perustuen alettiin suunnitella sopivaa pulssilähdettä ohjaimelle. Signaalin luontiin ja käsittelyyn päätettiin käyttää yleisesti hyväksi havaittua 555-ajastinpiiriä. 555-ajastinpiiri on hyvin monikäyttöinen. Sen toiminta

perustuu pääosin kolmen samankokoisen vastuksen jännitejakoon, joka voidaan nähdä kuvasta 11. Sillä voidaan rakentaa helposti erilaisia ajastimia, puls-sigeneraattoreita sekä flip-flop-kiikkuja. Tämän työn yhteydessä tuli tutustuttua hyvin kaikkiin kolmeen kytkentään, ja samalla tuli opittua hyvin, kuinka ne tulee mitoittaa. (Sedra, A. & Smith, K. 1998)



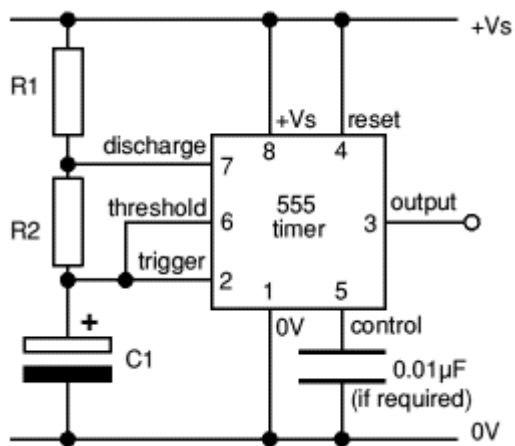
KUVA 11. 555-piirin sisäinen kytkentä (Sedra, A. & Smith, K. 1998).

Ensimmäisen osion kytkennässä muodostaa 555-piirin astabiili kytkentä, joka värähtelee tietyllä taajuudella. Taajuus f asetetaan kuvassa 12 näkyvien vastusten $R1$ ja $R2$ sekä kondensaattorin $C1$ avulla kaavan 1 mukaisesti.

KAAVA 1. Taajuuden määräytyminen astabiilissa piirissä.

$$f = \frac{1.4}{(R1 + 2R2) \cdot C1}$$

Kun kytkentään vaihdetaan säätövastus $R2$:en tilalle, voidaan taajuutta nostaa ja laskea helposti. Kytkennän ongelmana on sen suuri pulssisuhde, joka on aina yli 50% taajuudesta riippuen.



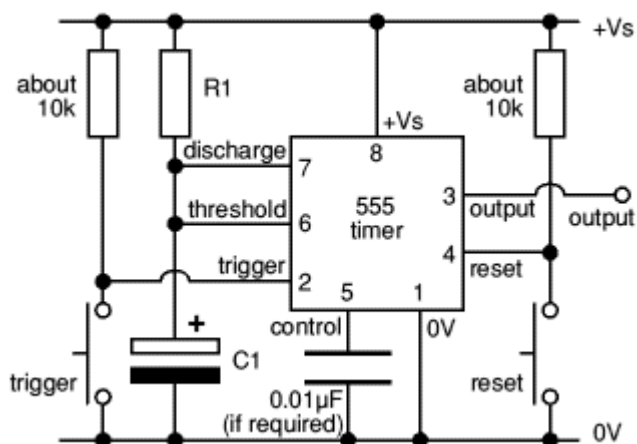
KUVA 12. Astabiili kytkentä (Electronics club).

Pulssisuhdetta saadaan rajattua 555-piiristä rakennetulla monostabiililla kytkennällä. Kun katsotaan kuvaa 13 nähdään, että pulssin pituuden T määrittely tapahtuu vastuksella $R1$ ja kondensaattorilla $C1$ kaavan 2 mukaisesti.

KAAVA 2. Jakson pituuden määrytyminen monostabiilissa piirissä.

$$T = 1.1 \cdot R1 \cdot C1$$

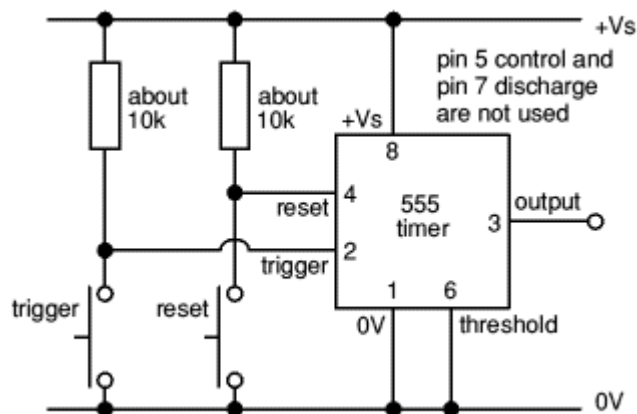
Kuvassa voidaan nähdä myös trigger-tulo, joka toimii tulona edellä olevalle taajuusgeneraattorille. Kun taajuusgeneraattorilta saapuvaa signaali kulkee monostabiilin kytkennän läpi, on sen pulssisuhde saatu laskettua haluttuun 20%:iin.



KUVA 13. Monostabiili kytkentä (Electronics club).

Koska askelmoottoriohjaimessa oli tulo myös suunnanvaihdolle, päätettiin sille myös rakentaa sopiva logiikka. Suunnanvaihtotulo toimi +5 voltilla; kun tuloon

tuli jatkuva +5 voltia, suunta vaihtui, ja kun jännite kytkeytyi pois, suunta vaihtui takaisin. Tähän erittäin hyvin soveltuva kytkentä löytyi myös 555-piirin ympärille rakennettuna. Tämä kytkentä on ns. flip-flop, eli 555-piirin bistabiili kytkentä. Kytkennässä ulostuloa liipaistaan trigger- ja reset-tuloilla. Kun trigger-tulo liipais-
taan lähtö muuttuu +5 volttiin niin kauaksi aikaa, kunnes reset-tulo liipaistaan. Tätä kytkentää voidaan rajakytkimien avulla käyttää dollyn suunnanvaihtoon. Rajakytkiminä toimivat dollyn kumpaankin päähän asennetut mikrokytkimet, jotka vastaavat radan päätepisteissä esteisiin ja vaihtavat dollyn kulkusuunnan.



KUVA 14. Bistabiili kytkentä (Electronics club).

5 TESTAUS

Aloittaessamme laitteiston suunnittelua oli mietittävä sopiva materiaali kiskora-kennelmaan sekä dollyn runkoon. Aikaisemmassa laiteversiossa käyttämämme 32 mm:n muoviputki oli testattu jo varsin toimivaksi materiaaliksi, mutta se vei tilaa aivan liian paljon. Koska materiaalin piti olla magneettikenttiin reagoimaton-ta, alumiiniputki osoittautui hyväksi materiaaliksi.

5.1 Alumiinisen kiskolaitteiston testaus

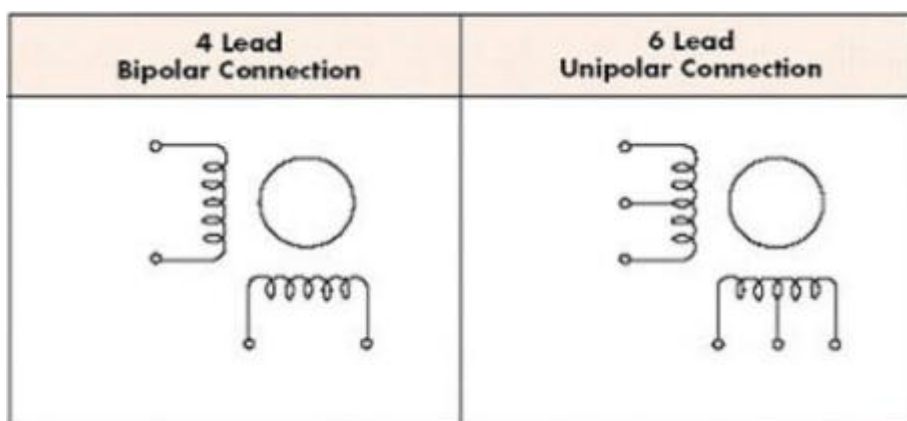
Kiskolaitteisto rakennettiin 12 mm:n alumiiniputkesta. Putkiin koneistettiin kierre-tapilla sisäkierteet, joihin voidaan kiertää jatkospalat. Tällä tavalla putket saa-daan liitettyä toisiinsa. Kiskolaitteistosta tulikin varsin toimiva, ja se saadaan pakattua pieneen tilaan. Putket katkottiin 40 cm:n pituisiksi, jolloin putket mah-tuvat esimerkiksi helposti vaikka laukkuun.

Parannettavaa jäi jonkin verran kierteiden koneistustarkkuuteen. Kotioloissa työstetyt kierteet eivät asettuneet aivan suoraan, vaikka oltiin erittäin huolellisia kierretapin asettelussa kierteityksen alussa.

5.2 Dollyn moottorin testaus

Alkuvaiheessa dollyn liikuttamista varten testattiin muutamia erilaisia moottori-tyyppejä. Ensiksi testattavana oli 12 voltin DC-moottori, johon oli kytketty lisäksi alennusvaihteisto. Hyvin nopeasti huomattiin tämä moottorityyppi sopimatto-maksi tähän laitteeseen, sillä moottori oli aivan liian nopeakäyntinen, vaikka siihen oli kytketty alennusvaihteisto. Tämä olisi tehnyt laitteen tarkasta kontrol-loinnista erittäin vaikeaa. Toiseksi ongelmaksi muodostui tämän kyseessä ole-van DC-moottorin väännön puute, sillä testauksien perusteella tämä testissä ollut moottori ei olisi jaksanut liikuttaa dollyä ongelmitta.

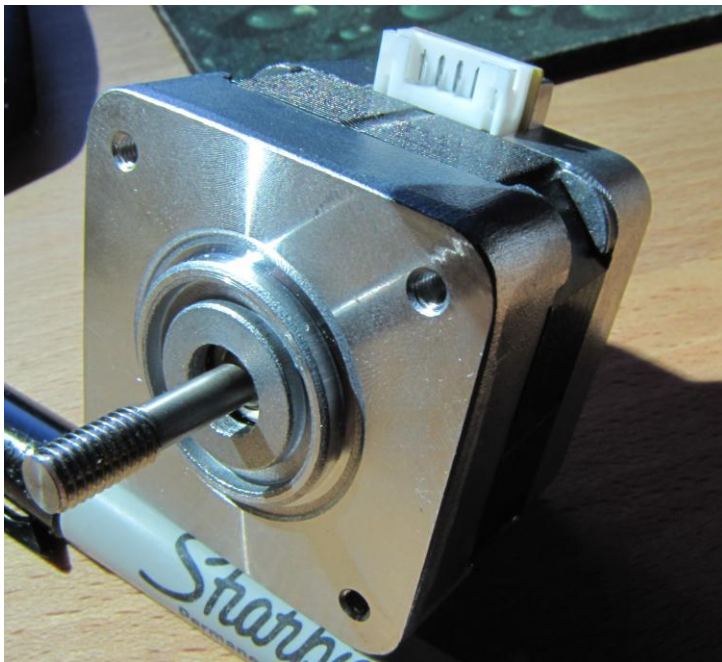
Testien perusteella huomattiin, että on varsin hankalaa kontrolloida DC-moottoria tarkasti. Näin ollen päätettiin miettiä myös muita moottorityyppejä. Perusteellisen pohdinnan jälkeen päätettiin ottaa testiin Mitsumin m35sp-9-askelmoottori, joka oli purettu vanhasta tulostimesta. Koska askelmoottorit vaativat ohjaamiseen oikeanlaisen ohjauselektroniikan, päätettiin ottaa pieni riski ja tilata sellainen, vaikka vielä ei tiedetty moottorityypin tarkasta sopivuudesta työhön. Aivan ongelmitta ei testaus kuitenkaan sujunut, sillä tulostimesta purettu unipolaarinen askelmoottori ei soveltunut hankitulle ohjaimelle. Hankittu ohjain oli tarkoitettu ainoastaan bipolaarisille askelmoottoreille. Ongelma kuitenkin saatiin ratkaistua. Kun tutkittiin moottorien sisäistä rakennetta, huomattiin, että pienellä modifiointilla voitiin tämä kyseinen moottori muuttaa soveltuvaksi bipolaariseen kytkentään. Kuvasta 15 voidaan nähdä, että jättämällä kytkemättä kelojen keskinavat voidaan unipolaarista moottoria ohjata bipolaarisen moottorin tavoin.



KUVA 15. Bipolaarisen ja unipolaarisen kytkennän erot (Optimal stepper motor).

Kun tämä modifikaatio suoritettiin testimoottorillemme, se alkoi toimia juuri halutulla tavalla. Moottorin toimintaa testattiin eri nopeuksilla, ja se tuntui toimivan kuten kuuluukin, vaikkakin moottori lämpeni varsin reilusti. Testauksen perusteella uskallettiin hankkia laitteeseen soveltuvampi moottori läheisestä elektroniikkaliikkeestä, ja moottoriksi valikoitui kuvassa 16 näkyvä Minebean valmistama bipolaarinen askelmoottori. Kun moottorin ominaisuuksia testattiin, huomattiin, että se oli todella tehokas. Mutta moottoria vaivasi edelleenkin reilu lämpeneminen. Kun suoritettiin lisää ajoa ja testausta moottorilla, huomattiin lämpenemisen liittyvän käytettävään kierroslukuun. Ajettaessa moottoria suu-

remmalla nopeudella se ei lämmennyt kuin nimellisesti. Pienillä nopeuksilla moottori lämpeni varsin rajusti, jopa lähes polttavaksi. Selitykseksi tähän löytyi moottorin pitovirta, joka pyrkii pitämään roottoria paikoillaan pienillä nopeuksilla.



KUVA 16. Minebean valmistama askelmoottori.

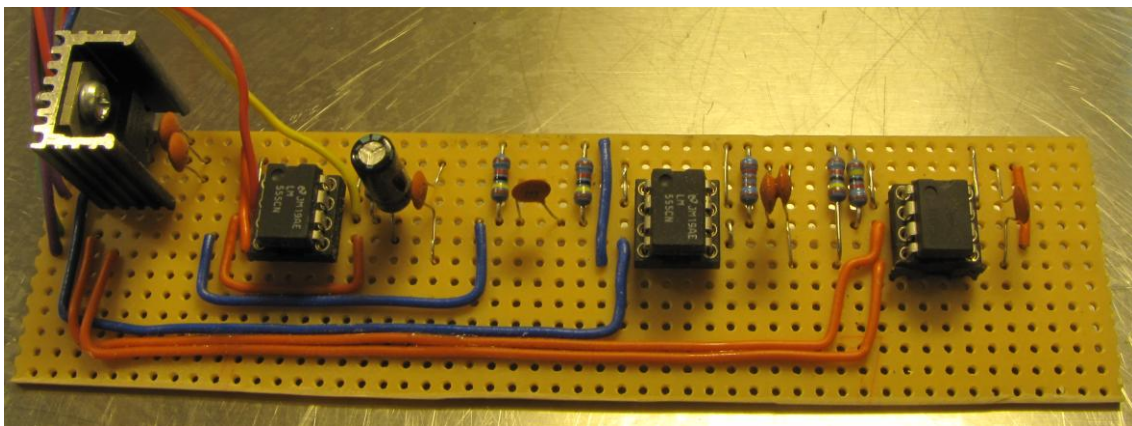
5.3 Ohjauselektronikan testaus

Askelmoottorihjaimelle suunniteltiin 555-piirin ympärille rakentuva pulssigeneraattori sekä suunnanvaihtologiikka. Pulssigeneraattori koostuu kahdesta osiosta, astabiilista värähtelijästä sekä monostabiilista liipaisupiiristä. Astabiililla piirillä saadaan luotua halutun taajuista kanttiaaltoa. Monostabiililla piirillä saadaan muutettua astabiilista värähtelijästä saadun kanttiaallon pulssisuhde tarpeeksi alhaiseksi.

Piirit testattiin koulun laboratoriossa ennen askelmoottorihjaimen kytkemistä. Kuvassa 17 nähdään, kuinka laite on kasattu Vero-levylle. Levyn aivan vasemmassa reunassa on regulaattori, kaksi piiriä keskellä levyä muodostavat pulssigeneraattorin ja aivan oikeassa reunassa oleva kytkentä hoitaa suunnanvaihtologiikan. Kytkentään lisättiin myös 7805-tyyppinen regulaattori, jolloin kytkennälle voidaan käyttää samaa virtalähdettä kuin moottorille. 7805-regulaattori muodostaa sille syötetystä jännitteestä 5 voltin jännitettä. Se tarvitsee minimissään 7

voltia toimiakseen ja maksimijännite sille on 35 voltia, jolloin se soveltuu erinomaaisesti moottorin 24 voltin virtalähteestä saatavalle jännitteelle.

Kytkenän oikeaoppinen toiminta varmistettiin oskilloskoopilla. Astabiiliin piiriin on kytketty säädettävä potentiometri, jolla taajuutta voidaan muuttaa. Oskilloskoopin ruudulta voitiin todetta potentiometrin virheetön toiminta; kun sitä säädettiin maksimi- ja minimiarvoihinsa, alarajataajuus oli testattaessa n. 7 hertsiä ja ylärajataajuus n. 1300 hertsin kohdalla. Kun kytkentää testattiin kokonaisuutena yhdistettynä moottoriin, huomattiin pyörimisnopeuden olevan aivan liian suuri. Tällöin päätettiin vaihtaa astabiilin kytkennän 1 μF kondensaattori 10 μF vastaavaan, jolloin taajuusalue ulottuu 0,7 hertsistä 130 hertsiin. Myös monostabiili piiri tuli mitoittaa uudestaan, ettei pulssisuhde mene liian pieneksi. Tässä tapauksessa askelmoottorihjain ei rekisteröisi niitä. Kun laitteistoa testattiin uudestaan, päästiin haluttuihin pyörimisnopeuksiin jo alimmilla asetuksilla.

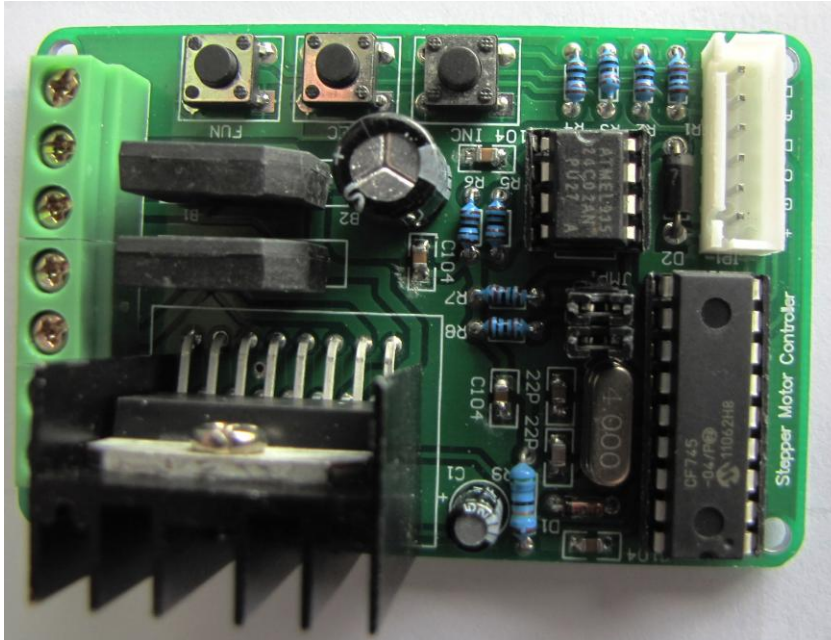


KUVA 17. Pulssigeneraattori ja suunnanvaihto kytkentä verolevyllä rakennettuna.

Myös bistabiilin piirin toiminnan oikeellisuus varmistettiin oskilloskoopilla. Piiri testattiin maadoittamalla piirissä olevia kahta tuloa, trigger ja reset. Maadoittamalla hetkellisesti trigger-tulo piirin lähtö muuttui 5:een volttiin niin kauaksi aikaan, kunnes reset-tulo liipaistiin maadoittamalla. Nyt lähdön tila muuttui takaisin tasoon 0 voltia.

Bistabiililla piirillä hallitaan dollyn liikesuuntaa. Kun piirin kytketään kaksi maadoittavaa mikrokytkintä, jotka liipaisevat radan päätepisteissä, ei ulkoista val-

vontaa tarvita dollyn suunnanvaihtoon. Mikrokytkimet kiinnitettiin dollyn kumpaankin päähän, jolloin ne radan päätepisteessä maadoittavat, trigger- tai reset-tulon tilanteesta riippuen, ja dollyn suunta vaihtuu.



KUVA 18. Askelmoottorihjain.

Laitteessa käytettiin kuvassa 18 olevaa askelmoottorihjainta. Kuvan vasemmassa reunassa ovat ruuviliittimet moottorin 24 voltin syöttöjännitteelle sekä moottorin keloille lähtevät ohjausliitynnät. Piirilevyn yläreunassa olevilla painonapeilla voidaan moottoria manuaalisesti, kuten vaihtaa suuntaa ja muuttaa nopeutta. Oikeassa yläreunassa on liityntä käyttöjännitteelle sekä ulkoisille ohjaussignaaleille, joita tässä työssä käytettiin. Ulkoiseen ohjaussignaaliiliittimeen voidaan mm. moottorinnopeuden säätö kanttiaaltona, sekä moottorin suunnan vaihto +5 voltin ja 0 voltin tasoina.

6 JATKOKEHITYSMAHDOLLISUUDET

Dollyn kehitys jatkuu vielä eteenpäin; toinen henkilö jatkaa dollyn toiminnallisuuksien kehittämistä lisäämällä siihen panorointi- ja tilitys- mahdollisuudet.

Jos kehitystä jatketaan askelmoottoreihin perustuvana samantyyppisillä ohjainpiireillä, olisi laitteisto helppo muuttaa kokonaan mikrokontrollerilla ohjattavaksi. Mikrokontrollerissa voitaisiin ohjelmallisesti muodostaa laitteen ohjaamiseen vaadittavat erilaiset pulssisignaalit sekä ohjaukseen tarvittava logiikka.

7 YHTEENVETO

Työssä valmistui kompakti koottava kiskolaitteisto, joka voidaan pakata pieneen tilaan. Kiskoihin rakennettiin myös siihen yhteensopiva dolly.

Työn edetessä tuli paljon uutta tietoutta eri tyyppisistä askelmoottoreista sekä minkä tyyppisiä ohjauselektroniikoita niiden kanssa tulee käyttää. Myös piirisuunnittelu tuli tutuksi tehtäessä 555-piiriin perustuvia kytkentöjä. Niiden mitoittaminen ja niiden testaaminen oli varsin mukavaa harjoitusta. Kytkenät kasattiin Vero-levylle, jota käytetään yleisesti prototyyppien rakenteluun. Tässä yhteydessä olisi ehkä ollut myös mahdollista kokeilla piirilevyjen tekoa itse hapottamalla. En kuitenkaan ottanut riskiä levyjen epäonnistumisesta, koska en ollut aikaisemmin hapottanut piirilevyjä itse.

Hyvää harjoitusta saatiin myös metallintyöstöön. Alumiinin parissa oli mukava työskennellä, koska sitä oli kohtuullisen helppoa muokata. Siitä sai valmistettua varsin monenlaisia osia. Työssä oli käytössä myös alumiiniputkien lisäksi 1 mm:n alumiinipeltiä, josta sai tehtyä kiinnikkeitä ja tukia.

LÄHDELUETTELO

Brickhouse security. 2012. Advanced pan/tilt wireless internet camera server. Hakupäivä 9.2.2012 <http://www.brickhousesecurity.com/trendware-tv-ip400w.html>

Electronics club. 2012. 555 and 556 timer circuits. Hakupäivä 2.3.2012 <http://www.kpsec.freeuk.com/555timer.htm>

Kunststoff-Zerspanung. 2012. RCH-1000 datalehti. Hakupäivä 12.02.2012 www.kunststoffdrehteile.de/v2/englisch/leistungen/pdf/rch_1000.pdf

Laine, M. 2012. Askelmoottorit. Hakupäivä 28.3.2012 www.ele.tut.fi/teaching/ele-3350/askelmoottorit.pdf

Optimal stepper motor. 2012. Unipolar vs bipolar stepper motor. Hakupäivä 21.2.2012 http://www.osmtec.com/unipolar_vs_bipolar.htm

Picworld. 2012. Askelmoottoriohjaimen datalehti. Hakupäivä 12.02.2012 <http://www.nbgelin.com/motor.htm>

Sedra, A. & Smith, K. 1998. Microelectronic circuits. Neljäs painos. New York: Oxford university press.

SP-elektroniikka. 2012. Minebea askelmoottori datalehti. Hakupäivä 12.02.2012 <http://www.spelektroniikka.fi/kuvat/pm.pdf>

Wexon Oy. 2012. Askelmoottorit Hakupäivä 28.3.2012 <http://www.wexon.fi/sivu.php?id=86>

Wikipedia. 2012. Pulssisuhde. Hakupäivä 8.3.2012 <http://fi.wikipedia.org/wiki/Pulssisuhde>

LIITTEET

Liite 1: Astabiilin ja monostabiilin piirin sarjakytKentä

Liite 2: Flip-flop-kiikun kytKentä

Liite 3: Jänniteregulaattorin kytKentä

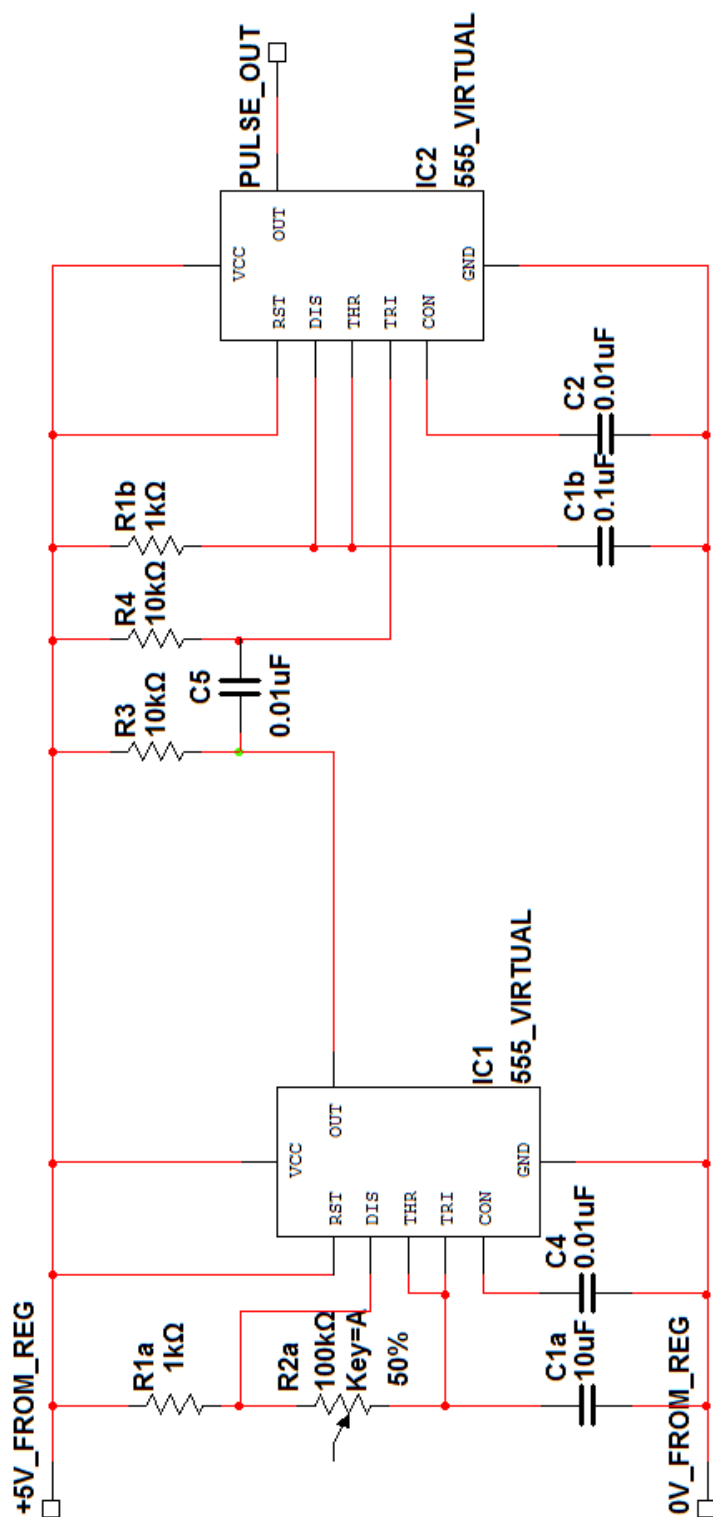
Liite 4: Askelmoottorin datalehti

Liite 5: Askelmoottorihjaimen datalehti

Liite 6: RCH-1000 datalehti

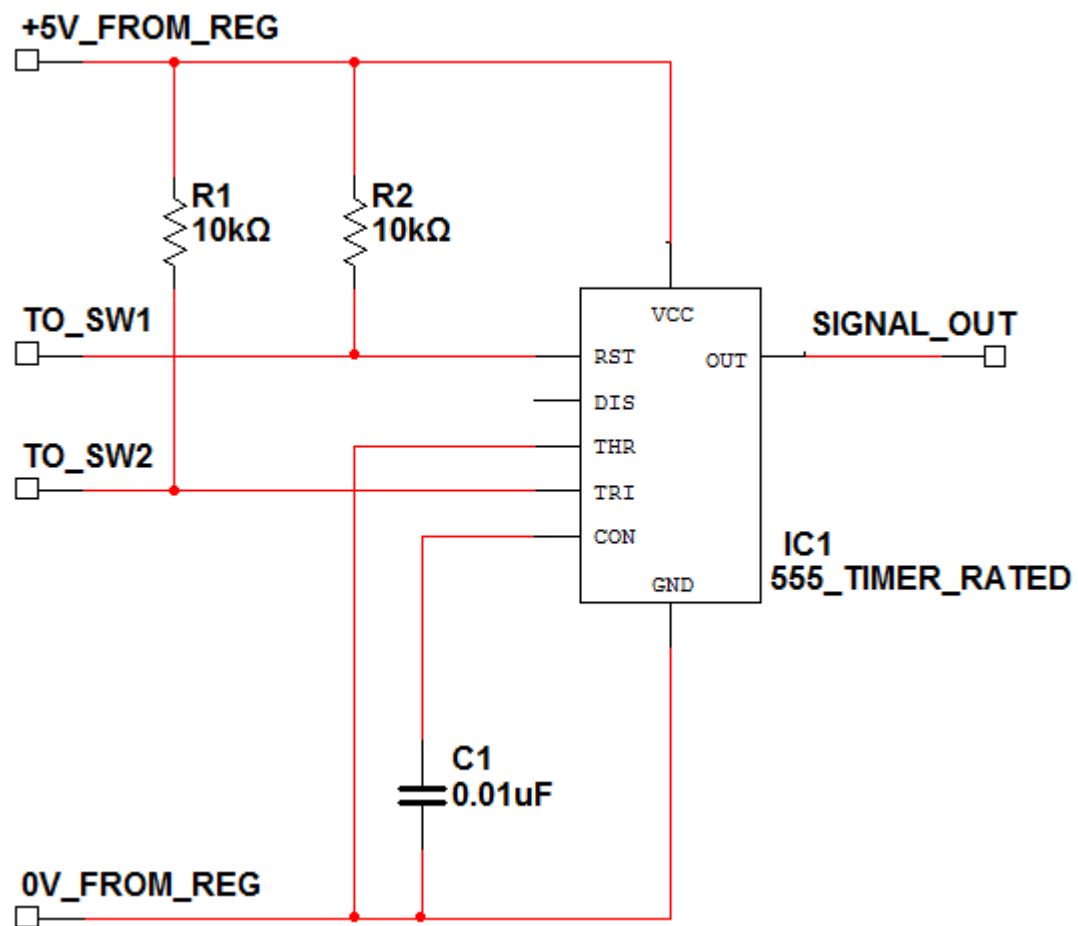
LIITE 1

ASTABIILIIN JA MONOSTABIILIN PIIRIN SARJAKYTKENTÄ



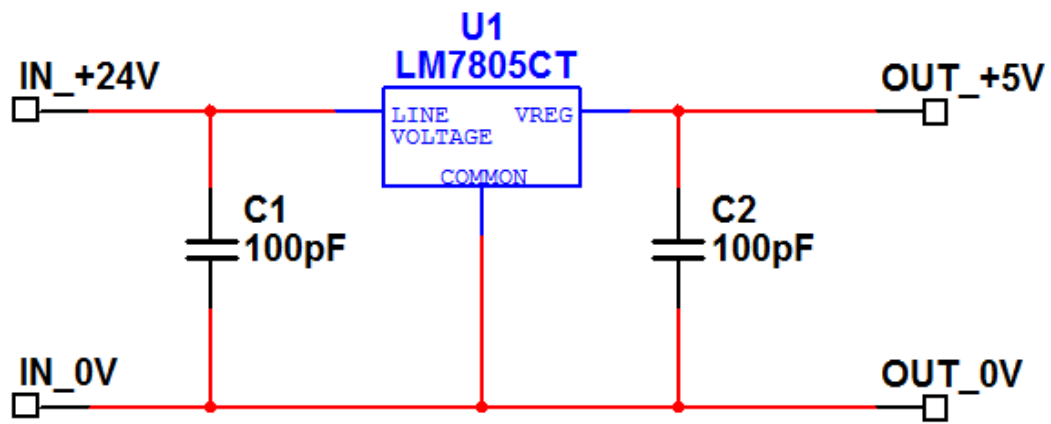
LIITE 2

FLIP-FLOP-KIIKUN KYTKENTÄ

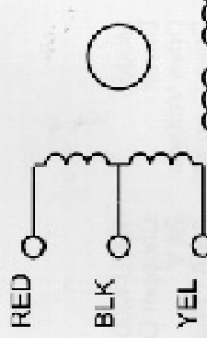
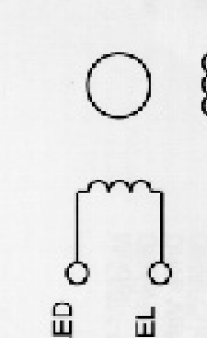
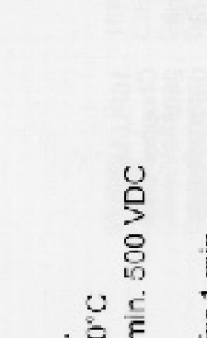
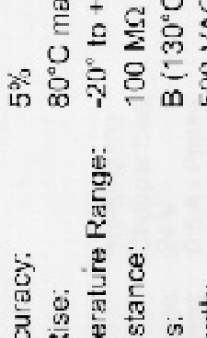


LIITE 3

JÄNNITEREGULAATTORIN KYTKENTÄ



LIITE 4
ASKELMOOTTORIN DATALEHTI

General Specification	Winding Diagram	
Step Angle Accuracy:	5%	
Temperature Rise:	80°C max.	
Ambient Temperature Range:	-20° to +50°C	
Insulation Resistance:	100 MΩ min. 500 VDC	
Insulation Class:	B (130°C)	
Dielectric Strength:	500 VAC for 1 min.	
Radial Play:	0.02 mm max. (450 g load)	
End Play:	0.08 mm max. (450 g load)	
Options		
Rear Shaft, Encoder, Gearbox,		
Connector Assembly		
1.8 astetta / askel, bipolaarinen kytkentä, moottori unipolaarinen.		
Akselissa 5mm kierre, n. 24 ohm./käämi = unipolaarisessa kytkennässä		
n. 12 ohm/vaihe. Moottorin paino 180g. Leveys 42 x 42 mm.		
Syvyys 34 mm. Voima n. 15Ncm/24V/0.6A/vaihe.		

LIITE 5

ASKELMOOTTORIOHJAIMEN DATALEHTI

Stepper Motor Controller & Driver Board I (2 Control Modes)



Profile

This stepper motor control&drive board has two control modes switched by jumper JP1:

1. By pulse and signals (JP1 Removed)

Input pulse and signals to control the motor run, stop and direction.

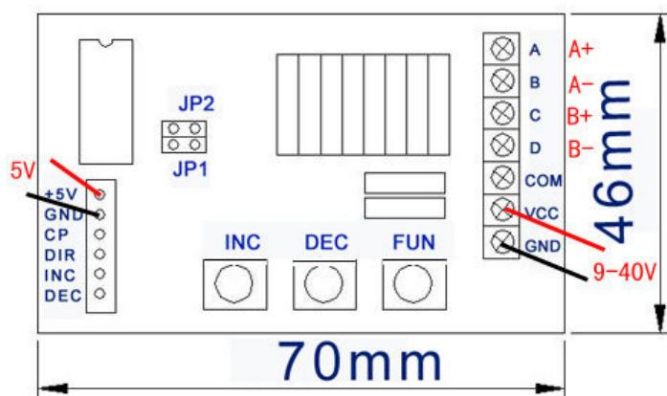
2. By buttons (JP1 Mounted-On)

There are 3 buttons marked "INC" "DEC" "FUN" on the board, you can press them to control stepper motor accelerate/decelerate, CW/CCW, stop etc.

For the board's flexibility (it can work even without pulse), so it suit for experiment demo, prototype making, student training, people DIY etc.

Functions And Features:

1. Matching motors: 6 wires or 4 wires stepper motor, 2-phase, amperage<2A.
2. Operation volage: 5VDC for the board, 9-40VDC for stepper motor.
3. Motor speed can be adjusted and memorized.



Operation Menu:

1. Motor Wires Connecting

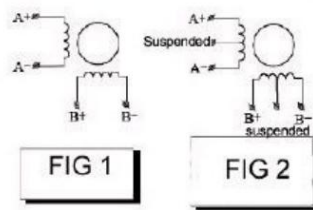
A+ to A;

A - to B;

B+ to C;

B - to D;

Common Empty (If it's 6 wires motor)



2. Control by pulse and signals (JP1 Removed)

5VDC for board: +5V, GND

9-40VDC for stepper motor: VCC, GND

Input pulse: **CP** (one pulse=one step, differ frequency can adjust step motor speed)

Direction signal: **DIR** (high voltage=inc ; low voltage=dec)

3. Control by buttons (JP1 Mounted-On)

5VDC for board: +5V, GND

9-40VDC for stepper motor: VCC, GND

JP2 Mounted-On

INC: CW run

DEC: CCW run

FUN: Stop

JP2 Removed

INC: Acceleration (One time of pressure, one speed level upgraded. You will find it turn faster apparently after several times of pressure.)

DEC: Deceleration (Though CCW run, you will find it slow down apparently after several times of pressure.)

FUN: Speed memory

(Suggest you can mount-on JP2 after speed adjustment, then it be memorized even power off.)

Note:

Please turn off power supply before you mount-on or remove the jumpers.

in PCB have a 24c02 DIP8 chip, this chip function is memory speed value, EEPROM address is 0x08, [you also can use eeprom programmer to change this value to change motor speed.](#)

documentation:

[PCB picture1](#)

[PCB picture2](#)

[PCB picture3](#)

[L298N dual full-bridge driver datasheet](#)

LIITE 6

RCH-1000 DATALEHTI



RCH 1000		ultra-high molecular polyethylene		
Main features				
high resistance to acids and caustic materials, high resistance to cold and notched impact strength, excellent sliding properties, absorbs no moisture, outstanding wear resistance				
Areas of application				
chain guide rails, conveyor drives, guides, seals and sliding rings in the foodstuffs industry, pump components, nozzles, screw fittings, adapters				
Physical properties		Standard	Unit	Drying
Density		g/cm ³	ISO 1183	0,93
Water absorption		%	ISO 62 (similar)	0,02
Moisture absorption		%	ISO 62 (similar)	
Mechanical properties				
Yield stress		N/mm ²	ISO 527	20
Breaking elongation		%	ISO 527	
Tension fatigue module		N/mm ²	ISO 527	600
Charpy impact resistance +23 °C		kJ/m ²	ISO 179	NB
Charpy impact resistance -30 °C		kJ/m ²	ISO 179	
Charpy notched impact resistance +23 °C		kJ/m ²	ISO 179	
Charpy notched impact resistance -30 °C		kJ/m ²	ISO 179	
Thermal properties				
Permanent usage temperature		°C		90
Short-term usage temperature		°C		125
Form stability HDT/A at 1.8 N/mm ²		°C	ISO 75	125
Thermal length expansion coefficient 20-80°C		10 ⁻⁴ /°C	ASTM E831	1,7
Combustibility			UL 94	HB
Electrical properties				
Dielectricity index (1 MHz)			IEC 250	3
Dielectric loss factor (1 MHz)			IEC 250	
Spec. volume resistance		cm	IEC 93	>1 10**14
Spec. surface resistance			IEC 93	1 10**11